

회복전압측정 방법을 통한 식물유와 광유에 따른 절연지의 수분 흡습 특성

정진혜\*, 한상옥\*, 이세현\*\*, 박강식\*\*\*  
 충남대\*, 한국폴리텍대학IV\*\*, 대덕대학\*\*\*

A moisture absorption characteristics of insulation papers on the vegetable oil impregnated paper and the mineral oil impregnated paper

Jin-Hye Jeong\*, Sang-Ok Han\*, Sei-Hyun Lee\*\*, Kang-Sik Park\*\*\*  
 Chungnam University\*, Korea Polytechnics IV\*\*, Daeduck college\*\*\*

**Abstract** - 본 논문은 RVM(Return Voltage measurement)을 이용하여 식물유와 광유에 따른 절연지의 수분 흡습성에 관한 특성을 비교하였다. 시험 절연재료로써 절연유는 각각 식물유(Bio Trans 1000, Cargill사)와 광유(제1종 2호, 동남석유(주))를 사용하였고, 절연지는 셀룰로오스계 크래프트 절연지를 사용하였다. 각 조건에서 IEEE/ANSI Standard C59.91-1981의 기대수명 곡선에서 55°C 절연을 기준으로하여 가속 열화 시험을 수행한 후, 15°C씩 온도를 변화시켜 RVM 측정을 하였다.

극이 일어나는 계면 분극이나 배향 분극은 탈분극이 일어나지 못하게

1. 서 론

국내 배전용 변압기 운영체제에서 변압기의 일반적인 수명은 26년으로, 변압기 운영 13년 경과시 교체 및 수리를 하고 그 후 13년 운영을 마치고 폐기하는 형태이다.

현재 우리나라는 초기 배전설비 도입시기인 1970년 대 중반에 비하여 급격한 산업고도화를 이룩함에 따라 변압기 운용 기수 또한 급격하게 증가하고 있는 추세이다. 따라서 초반에 설치된 많은 수의 변압기가 수리 및 교체의 단계를 거치고 있으며, 이때는 많은 경제적 비용이 발생한다. 사용 변압기의 수리 및 교체과정과 현재 급격히 증가하는 변압기의 운용기수를 고려할 때 변압기의 개선 및 정확한 진단연구를 통하여 자칫 대형사고로 확산될 수 있는 단락사고 등을 예방하고 변압기의 정확한 잔존수명 파악으로 장기사용가능여부 판단을 위한 기준이 필요하다.

국내 배전용 변압기의 절연은 크래프트지와 광유에 의해 이루어지고 있고, 이 절연물질들은 기타 코일이나 권선등에 비하여 변압기의 수명에 크게 영향을 미친다.[1] 실험적으로 사용으로 인한 절연유의 열화효과는 크게 나타나지 않는다는 것이 나타났고[2] 실제 발생하는 변압기 사고의 85%도 열화 등으로 인한 절연지의 성능저하로 중간단락의 사고가 발생하는 경우가 대부분이다. 따라서 변압기의 수명에는 절연유보다 절연지의 영향이 더 크다고 할 수 있다. 그러나 절연지는 변압기가 폐기되어 내부를 열어보기 전까지는 직접적인 진단이 어려우므로 푸란계 검출, 열화시 생성되는 가스 분석 등의 간접적인 방법을 통하여 진행되고 있다. 본 논문에서는 RVM을 통해서 광유와, 근래 변압기유의 개선책으로 연구되고 있는 식물유에 함침된 절연지의 수분 흡습성 비교실험을 수행하였다.

2. 본 론

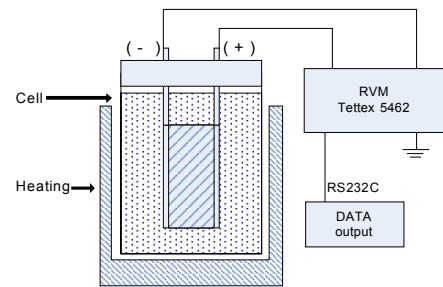
2.1 실험 장치 및 방법

2.1.1 실험 장치

본 시험에서는 광유와 식물유의 온도에 따른 특성을 비교하기 위하여 신폴 광유로는 동남석유(주)의 제1종 2호, 신폴 식물유로는 Cargill사의 Bio Trans 1000, 그리고 절연지는 셀룰로오스계 크래프트지를 사용하였다. 절연유 및 절연지 동일한 조건으로 탈기 및 건조시켰고, 실험장치가 변압기의 상용 조건에 이르도록 160°C에서 50시간 열화를 진행하였다. RVM 측정을 위한 변압기 모의 셀의 전극은 크기120mm×50mm로 제작하고 절연지는 1차권선과 같이 전극을 4회 감아 절연을 도모하였으며 양 전극을 최대한 밀착고정 하였다. 또한 전극과 덮개 그리고 덮개와 셀 접속부에는 각각 테플론과 O-ring을 사용하여 기밀 및 절연을 기능을 보장하였다. 모의셀과 Heating 장치, RVM의 연결 구성은 <그림1>과 같다.

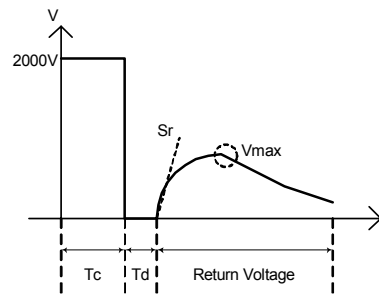
2.1.2 RVM(Return Voltage measurement;회복전압법)

회복전압법 측정은 양 전극간에 일정시간(Tc)으로 충전, 충전시간의 1/2시간(Td)으로 방전을 수행한 후 전원부를 개방하여 나타나는 회복전압을 분석하여 수분을 측정하는 방법이다. 양 전극의 충전시간(Tc)에는 절연물질의 분극이 발생하고, 방전(Td)동안에는 상기 발생한 분극의 탈분극이 이루어지게 된다. 방전시간(Td)을 Tc/2로 설정함으로써 낮은 분

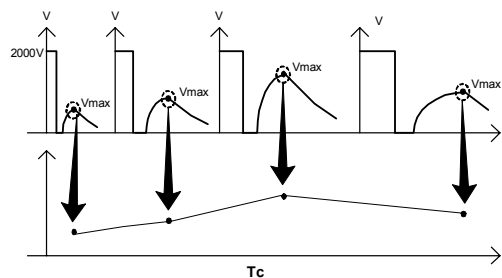


<그림 1> RVM 셀 및 연결도

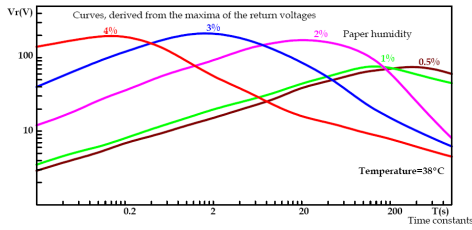
되고, Td 후에 양 전극을 개방하면 전압으로서 검출된다. 일정 충전시간에 따른 회복전압을 충전시간 기준으로 나열하여 구성된 곡선을 최대 회복전압 곡선이라고, 최대 회복전압곡선의 분포를 통하여 기기를 분해하지 않고도 내부의 수분 측정치가 가능하다. <그림2.1>은 회복전압의 특성을 나타낸 그래프로서 Tc:충전시간, Td:방전시간, Vmax: 최대회복전압, Sr:초기 기울기, Vc:충전전압을 의미하며 그래프에서 나타나는 Vmax와 Sr은 수분 함유량 진단에 매우 중요한 요소이다. <그림2.2>는 충전시간에 따른 회복전압을 충전시간별로 나열하여 구성된 그래프로서 최대회복전압 곡선이다. <그림3>[3]은 수분량에 따른 회복전압 곡선으로 최대회복전압이 그래프의 좌측, 즉 빠른 충전시간에서 나타날수록 수분량이 많다는 것을 나타낸다.



<그림 2.1> 회복전압 곡선 특성



<그림 2.2> 최대회복전압곡선



〈그림 3〉 온도에 따른 최대회복전압 곡선의 특성

## 2.2 실험 방법

IEEE/ANSI Standard C57.91-1981[4]의 Arrhenius Reaction rate Theory에 따르면 55°C 절연시스템에서 hottest-spot이 160°C일 경우 약 440 시간이면 수명이 다한다는 것을 알 수 있다. 식(1)은 Arrhenius 식에 준하여 절연물의 온도와 시간관계를 나타낸 식이다.[5] 단, T는 hottest-spot온도(K), Life는 hour를 의미한다.

$$55^\circ\text{C Insulation Systems } \log_{10}(\text{Life}) = \frac{6328.8}{T} - 11.968 \quad \text{〈식 1〉}$$

본 시험에서는 열화시간을 전체수명의 약 1/8인 50시간으로 설정함으로써 변압기의 상용상태를 모의하였다. 열화를 마친 셀은 약 10시간정도 상온에서 자연적으로 온도가 25°C까지 하강하도록 하였고, 단계별로 측정 온도를 변화할 때마다 약 5시간정도 지난 후 RVM측정을 하였다. 온도변화단계는 15°C간격으로 25°C, 40°C, 55°C, 70°C로 설정하였다. 또한 RVM 측정시 충전전압은 2000 V로 인가하였고 15단계(Tc : 1000s)까지의 결과를 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 온도 특성

전처리 과정을 거친 셀을 열화시키기 직전 Karl-Fisher를 이용하여 수분을 측정하였다. 절연유 탈기 후 절연지를 삽입하지 않은 상태에서 측정된 값이며, 식물유와 광유의 포화량이 다르기 때문에 초기 상태도 다르다.

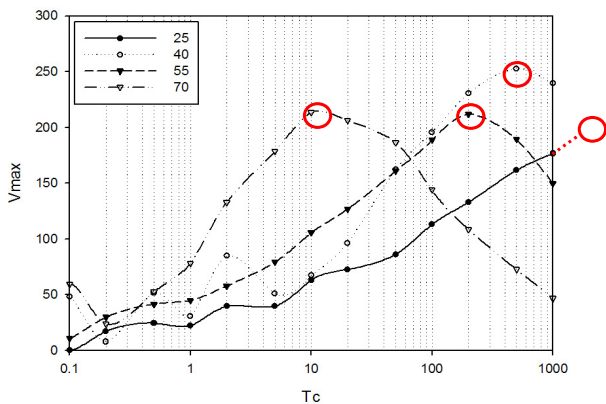
〈표 1〉 초기 수분 함유량

|          | 광유     | 식물유   |
|----------|--------|-------|
| 함유량(ppm) | 180ppm | 20ppm |

#### 3.1.1 광유의 온도특성

〈그림4〉는 광유함침 모의 셀의 RVjuM 측정 결과이다. 광유는 초기 수분 함유량이 매우 적었기 때문에 낮은 온도인 25°C에서는 최대회복전압이 Tc 1000s 이내에 나타나지 않았다. 40°C에서는 최대회복전압이 나타났고 온도의 증가에 따라 큰 폭으로 그래프의 좌측으로 이동하는 모습을 볼 수 있다.

Mineral Oil



〈그림 4〉 광유의 RVM 측정 결과

#### 3.1.2 식물유의 온도특성

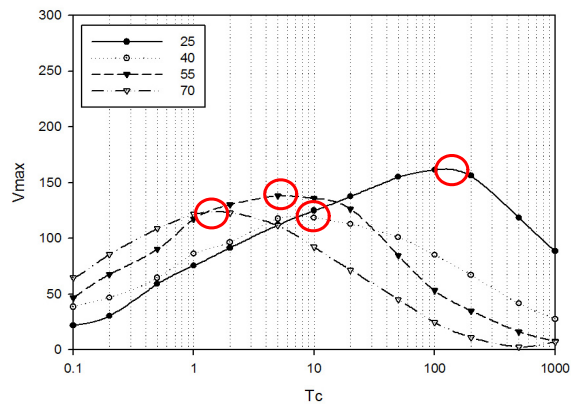
〈그림5〉는 식물유함침 모의 셀의 측정 결과이다. 광유는 식물유에 비하여 초기 수분함유량이 높았기 때문에 광유함침 모의셀의 결과에 비하

여 25°C일 때의 최대회복전압이 비교적 짧은 충전시간에 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그러나 온도에 따른 최대회복전압의 이동이 광유함침 모의셀에 비하여 매우 소폭으로 이동하여, 70°C일 때는 광유함침 모의셀과 크게 차이하지 않는다.

## 3.2 고찰

변압기의 온도 상승에 따라 절연유의 수분 포화량 증가, 절연지의 건조, 절연지와 절연유의 상호반응 등의 작용으로 변압기 내부의 수분 함유량이 증가하게 되는 메커니즘을 갖고 있으며, 상기 측정결과 그래프에서는 이러한 특성이 잘 나타나고 있다. 두 결과를 비교하면 식물유와 광유의 수분 포화량 상이 등의 이유로 시험초기상태가 다르기 때문에 낮은 온도에서 최대회복전압이 크게 차이가 난다. 그러나 온도가 증가함에 따라 점점 유사한 Tc에서 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 절연유의 포화량과 관련되어 있다고 판단된다. 온도가 상승할수록 절연지의 수분은 빠져나오려는 특성을 보이고, 절연유의 수분 포화량은 증가하는 특성을 보인다. 이 과정에서 상대적으로 수분포화량이 적은 광유는 절연지에서 배출되는 수분을 식물유에 비하여 적게 흡수하고, 느린 속도로 흡수하게 된다. 반면 식물유는 수분 포화량이 크기 때문에 절연지에서 증발되는 수분 흡수에 용이하다.

Vegetable Oil



〈그림 5〉식물유의 RVM 측정 결과

## 3. 결론

본 논문에서는 식물유와 광유의 전처리 및 열화 후, 온도를 25°C, 40°C, 55°C, 70°C로 상승시키면서 RVM측정을 하여 온도에 따른 수분흡수 특성을 비교하였다. 측정결과, 온도가 낮을시에는 최대회복전압이 나타나는 Tc가 크게 차이하지만, 온도가 높아질수록 식물유함침 모의셀과 광유함침 모의셀의 최대회복전압곡선이 유사한 Tc에서 나타나는 것이 확인되었다. 낮은 온도에서는 절연유의 수분이 절연지로 흡수되는 메커니즘이 나타나므로 이때의 특성은 절연지의 상태 및 특성이라고 할 수 있으며, 높은 온도에서는 절연지의 수분이 절연유로 배출되므로 절연유의 특성이 더 크다고 할 수 있다. 그러므로 〈그림4〉, 〈그림5〉의 결과를 통하여 동일한 절연지를 사용할 경우 수분포화량이 더 큰 식물유의 사용이, 절연지의 수분 흡수를 낮추어서 나아가서는 수분에 대한 영향 또한 감소시킨다는 결론이 얻어진다.

절연지 및 절연유의 열화과정에서는 H<sub>2</sub>O뿐만 아니라 푸란계 물질, CO<sub>2</sub>, CO, 등 다양한 물질 생성되므로 향후 열화에 대한 의존도가 큰 생성물에 대한 연구와, RVM과 PDC 등의 비파괴 진단방안에 대한 연구도 보다 활발하게 진행되어야 할 것이다.

## [참고 문헌]

- [1] "절연유중 furfural 분석에 의한 변압기의 경년열화도 진단에 관한 연구", T.IEE Japan, vol.112-A, No.6,1992
- [2] 박원주, "절연지에 의한 전력용 변압기 열화진단기술", 한국전기전자재료학회 2004년도 하계학술대회 논문집, 449-452, 2004
- [3] Csépees, Háamos, Kispál, Dr Osváath, Schmidt. "General State Diagnostics for Transformer and Cable Isolations."
- [4] IEEE/ANSI Standard C57.91-1981 "Guide for loading mineral-oil-immersed overhead and pad-mounted distribution transformers"
- [5] 이병성, "식물성 절연유를 사용한 배전용 변압기의 절연 및 냉각특성 해석", 학위논문, 2006